

24. Semmlow J. Circuits, signals, and systems for bioengineers, *Parasitic Element (Electrical networks)*, 2005, pp. 134-135.
25. Giron-Sierra J.M. Digital signal processing with matlab examples. Vol. 1: Signals and data, filtering, non-stationary signals, modulation. Springer, 2016.
26. Chaparro L., Akan A. Signals and Systems using MATLAB. Academic Press, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Хуссейн Ш. Мукер – Южный федеральный университет; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: +79612936340; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +79618170609; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Hussein Sh. Mogheer – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79612936340; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

Turulin Igor Ilich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +79618170609; the department of theoretical foundations of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.397.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-82-91

К.О. Север, И.И. Турулин, Д.А. Гужва

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СПОСОБОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ШУМА В ИЗОБРАЖЕНИИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАШУМЛЕННОСТИ

В современной технике фото- и видеосъемки любое изображение в процессе его формирования искажается под действием различных видов шумов. Существуют различные виды шумов, но на практике наиболее часто встречаются модели импульсного и гауссовского шума. Ослабление действия шумов достигается путём фильтрации. На данный момент не существует универсального фильтра, подавляющего данные типы шумов при различных интенсивностях искажения. Поэтому важным аспектом является определение области применения каждого вида фильтра при подавлении шумов в изображении и создании типа фильтра, состоящего из синтеза сочетающего различные методы фильтрации для оптимальной очистки изображения. В статье представлен сравнительный анализ медианной фильтрации и фильтрации Винера для устранения импульсного и гауссовского шума в изображении при разной степени зашумленности. Для моделирования использовалось одно изображение, искаженное отдельно импульсным и отдельно гауссовским шумом с вероятностями искажения пикселей от 1 % до 99 % включительно. Фильтрация производилась с окнами, равными 3x3 и 5x5. В результате были получены численные оценки качества фильтрации изображений на основе пикового отношения сигнал-шум (PSNR). На основе полученных данных была проанализирована область применения исследуемых фильтров, их модификации, достоинства и недостатки, а также приведены рекомендации по их использованию. В результате сравнительного анализа исследуемых видов фильтрации для зашумленных изображений было установлено, что медианный фильтр с окном 3x3 лучше справляется с очисткой изображения от импульсного шума малой интенсивности и с окном 5x5 – с очисткой изображения средней интенсивности зашумления. Также медианный фильтр лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при его средних и высоких значениях среднеквадратичного отклонения. Фильтр Винера с окнами 3x3 и 5x5 лучше фильтрует гауссовский шум при малых его значениях его среднеквадратичного отклонения. Также фильтр Винера лучше справляется с импульсным шумом относительно высокой интенсивности зашумления.

Обработка изображений; импульсный шум; гауссовский шум; фильтры; медианный фильтр; фильтр Винера.

K.O. Sever, I.I. Turulin, D.A. Guzhva

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO FILTERING METHODS
TO ELIMINATE NOISE IN AN IMAGE OF DIFFERENT DEGREES OF NOISE**

In modern photography and video technology, any image in the process of its creation is distorted by various types of noise. There are various types of noise, but in practice, impulsive and Gaussian noise models are the most common. Attenuation of the effect of noise is achieved by filtering. At the moment, there is no universal filter that suppresses noise data at various intensities of distortion. Therefore, an important aspect is to determine the field of application of each type of filter when suppressing noise in the image and creating a filter, consisting of a combination of different filtering methods for optimal image cleaning. The article presents a comparative analysis of median filtering and Wiener filtering to eliminate impulse and Gaussian noise in the image with different degrees of noise. For modeling, we used one image, separately distorted by impulse and separately by Gaussian noise with pixel distortion probabilities from 1% to 99% inclusive. Filtration was performed with windows equal to 3x3 and 5x5. As a result, we obtained numerical estimates of the image filtering quality based on the peak signal-to-noise ratio (PSNR). On the basis of the data obtained, the application of the investigated filters, their modifications, advantages and disadvantages were analyzed, as well as recommendations for their use were given. As a result of a comparative analysis of the studied types of filtering for noisy images, it was found that the median filter with a 3x3 window copes better with image cleaning from low-intensity impulse noise and with a 5x5 window - with image cleaning with an average noise intensity. Also, the median filter does a better job of filtering out Gaussian noise at its medium and high rms deviations. The Wiener filter with 3x3 and 5x5 windows better filters Gaussian noise at small values of its root-mean-square deviation. Also, the Wiener filter copes better with impulse noise with relatively high noise power.

Image processing; impulse noise; Gaussian noise; filters; median filter; Wiener filter.

Введение. В процессе формирования и приема-передачи цифровые изображения подвергаются влиянию различных шумов, что приводит к ухудшению визуального качества и потере участков изображений. Одной из основных задач цифровой обработки изображений является восстановление поврежденных пикселей (реставрация изображения по заданному критерию) [1].

При формировании изображений и до оцифровки шумы накладываются на аналоговый сигнал. Источники шума разделяют на:

1. Внутренние (неидеальность используемого оборудования) – цифровые шумы, вносимые оптикоэлектронными системами цифрового фотоаппарата (здесь и далее под термином «цифровой фотоаппарат» имеются в виду любые устройства оцифровки изображений).

2. Внешние (плохие условия съемки) – шумы, возникающие при ночной фото-, видеосъемке, неравномерности освещенности предмета [2, 11].

Оптическая система цифрового фотоаппарата вносит искажения в изображение в виде аберраций [12], а светочувствительные приемники (например, ПЗС-матрицы) – электронный шум [13].

Существуют различные виды шумов: импульсный, аддитивный гауссовский, мультипликативный, шум квантования, спекл-шум и другие [3, 11]. Но на практике наиболее распространенными являются модели импульсного и аддитивного гауссовского шума.

Отличительной чертой аддитивного гауссовского шума является добавление значений из соответствующего нормального распределения с нулевым средним значением к каждому пикселю изображения. Данный тип шума обычно возникает во время формирования цифрового изображения (например, шум сенсоров из-за высокой температуры и/или недостатка освещения).

Импульсный шум заменяет части пикселей на изображении значениями случайной или фиксированной величины. При визуальной оценке изображения импульсный шум проявляется в виде хаотично разбросанных черных и белых точек. Поэтому его часто называют точечным шумом или шумом «соль и перец» [14]. Данный вид шума связан с ошибками, возникающими при передаче и ошибочном декодировании изображений [4].

На данный момент существует множество методов очистки изображений от шума, которые зависят от типа шумового воздействия [5]. Алгоритмы шумоподавления обычно предназначены для подавления определенного типа шума. Универсальных фильтров, определяющих и подавляющих все типы шумов, пока не существует. Однако большинство шумов можно обобщить моделью белого гауссовского шума, поэтому большинство алгоритмов ориентируется на подавление данного вида шума. Наиболее популярными методами удаления шумов являются сглаживающие фильтры, фильтры Винера, медианные фильтры и ранжирующие фильтры [6].

Для меняющейся помехосигнальной обстановки могут быть применены управляемые цифровые фильтры [8], а для снижения вычислительной сложности – рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой (РКИХ) [9]. РКИХ-фильтр обеспечивает минимальные искажения изображений, так как может иметь линейную фазовую характеристику (в случае симметрии КИХ). В [10] предлагаются фильтры, сочетающие достоинства фильтров [9, 10] для несложных импульсных характеристик, например, двумерных окон, подходящих для сглаживания изображений. Однако в данной работе проведен только сравнительный анализ медианной фильтрации и фильтрации Винера для устранения импульсного и гауссовского шума при различной интенсивности искажения статического изображения.

Цель работы – определение области применения медианного фильтра и фильтра Винера при очистке изображений, искаженных импульсным и гауссовским шумом разной степени зашумленности.

Постановка задачи. Пусть имеется исходное изображение в оттенках серого. Требуется смоделировать импульсный и гауссовский шум с настраиваемым параметром интенсивности искажения, накладываемым на исходное изображение. Также необходимо смоделировать медианный фильтр и фильтр Винера для очистки зашумленных изображений. Для оценки качества фильтрации произвести вычисление характеристики PSNR (пиковое отношение сигнал-шум) для каждого зашумленного изображения.

Результаты моделирования. Для моделирования функций зашумления и последующей фильтрации использовалось изображение «Ноутбук», представленное на рис. 1,а.

Исходное изображение отдельно искажалось импульсным шумом (рис. 1,б) при помощи функции «addnoise» [7] программного пакета Mathcad 15.0 со следующими параметрами:

- ♦ $p = (0,05 \dots 0,99)$ – значение вероятности добавления шума на используемое изображение;
- ♦ $n = 150$ – значение интенсивности пикселя, добавляемого (или высчитываемого) в зашумленный пиксель.

Также исходное изображение отдельно искажалось гауссовским шумом (рис. 1, в). Для создания гауссовского шума использовалось следующее выражение (см. формулу 1):

$$\text{gnoise}(Q_{\text{avg}}, \sigma) = Q_{\text{avg}} + \sigma \sqrt{-2 \ln(\text{rnd}(1)) * \cos(2 * \pi * \text{rnd}(1))}, \quad (1)$$

где Q_{avg} – среднее значение шума, σ – среднеквадратическое отклонение, $\text{rnd}(x)$ – функция возврата равномерно распределенного случайного числа между 0 и x .

Используя функцию `gnoise`, были построены матрицы шумов с параметрами $Q_{avg} = 0$, $\sigma = (1 \dots 99)$ и добавлена на исходное изображение.

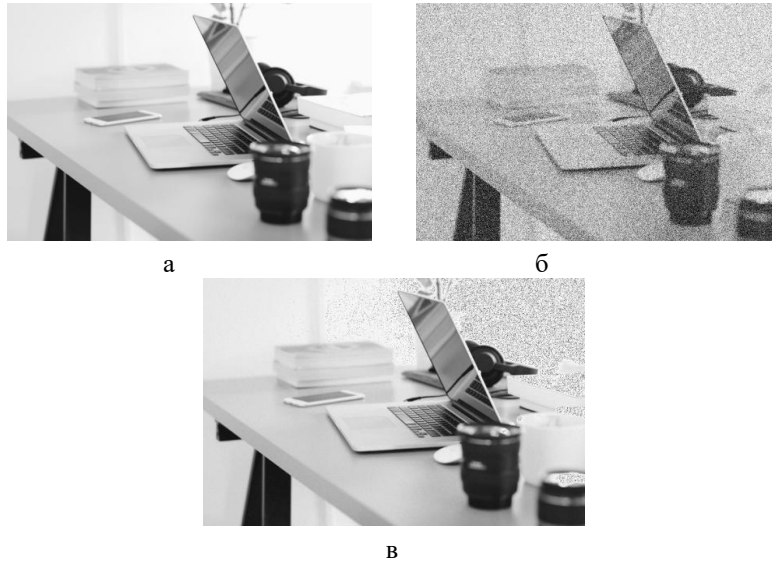
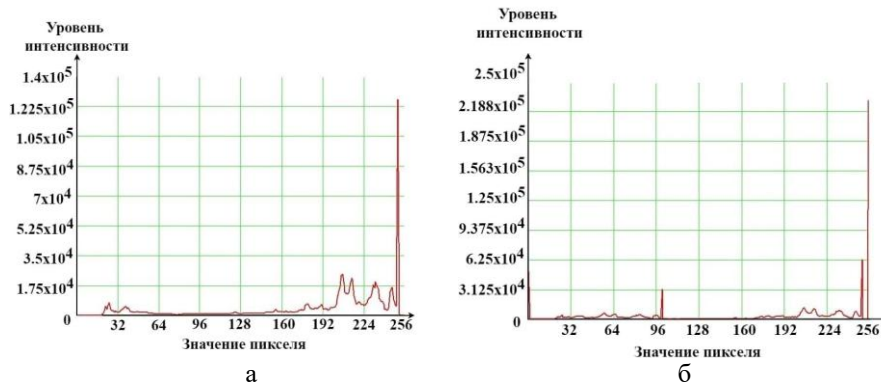


Рис. 1. Изображение: а – исходное; б – искаженное импульсным шумом с интенсивностью $p=0.5$; в – искаженное гауссовским шумом с параметрами $Q_{avg} = 0$, $\sigma = 5$

Для наглядного отображения влияния шумов на исходное изображение на рис. 2 представлены гистограммы исходного и зашумленных изображений. На гистограмме изображения зашумленного импульсным шумом (см. рис. 2,б) отчетливо видно, как в разы увеличивается интенсивность пикселей, соответствующих черному (значение пикселя равно 0) и белому (значение пикселя равно 255) цвету. При зашумлении изображения гауссовским шумом (см. рис. 2,в) с параметрами $Q_{avg} = 0$, $\sigma = 5$ наблюдается нормальное распределение шума и искажение пикселей только белого цвета. При увеличении среднеквадратического отклонения σ зашумлению подвергаются пиксели темных оттенков.

Очистка зашумленных изображений (см. рис. 1,б,в) производилась медианным фильтром с однородной матрицей фильтрующего ядра и с окнами 3×3 , 5×5 при помощи функции «`quanfilt`», и фильтром Винера с окнами 3×3 и 5×5 при помощи функции «`wiener2d`». На рис. 3, 4 показаны результаты обработки изображений.



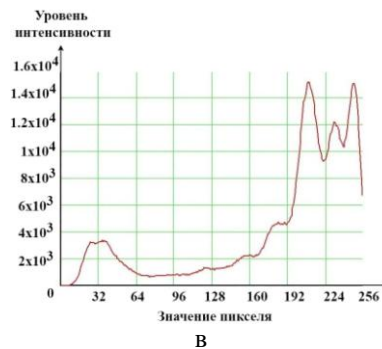


Рис. 2. Гистограмма изображения: а – исходного; б – искаженного импульсным шумом с интенсивностью $p=0.5$; в – искаженного гауссовским шумом с параметрами $Q_{avg} = 0, \sigma = 5$

Для оценки качества фильтрации изображения от шума использовалась характеристика PSNR (пиковое отношение сигнал-шум), вычисляемая по формулам 2-3:

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{N^2}{MSE} \right), \quad (2)$$

$$MSE = \frac{\sum_i \sum_j (y_{i,j} - x_{i,j})^2}{H_1 * H_2}, \quad (3)$$

где MSE – среднеквадратическая ошибка восстановленного изображения; N – максимальная величина пикселя изображения, в данном случае равняется 255; $y_{i,j}$ – восстановленное изображение; $x_{i,j}$ – исходное изображение; H_1 и H_2 – ширина и высота изображения.

Значения PSNR для каждого метода фильтрации по устранению импульсного и гауссовского шума при различных степенях зашумления представлены в табл. 1, 2.

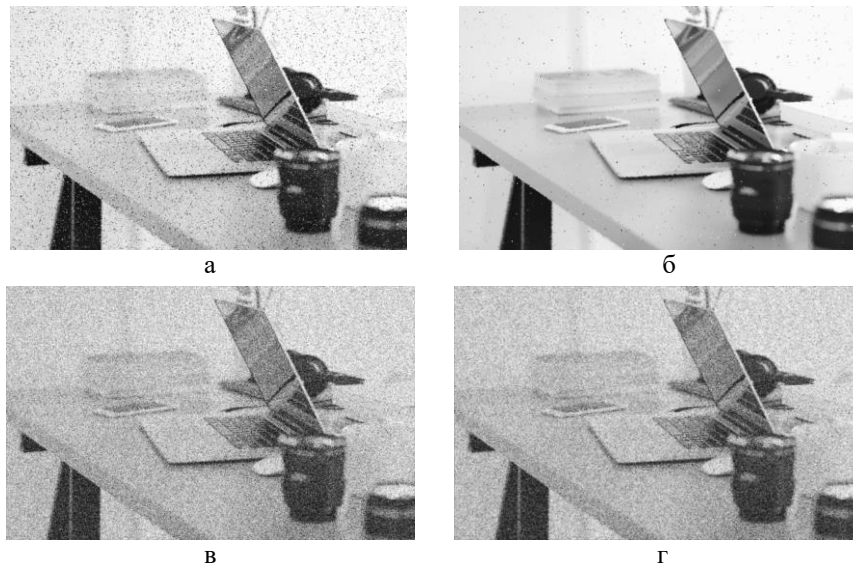


Рис. 3. Очищенное изображение от импульсного шума с интенсивностью $p=0.5$ после: а – медианной фильтрации с окном 3×3 ; б – медианной фильтрации с окном 5×5 ; в – фильтрации Винера с окном 3×3 ; г – фильтрации Винера с окном 5×5

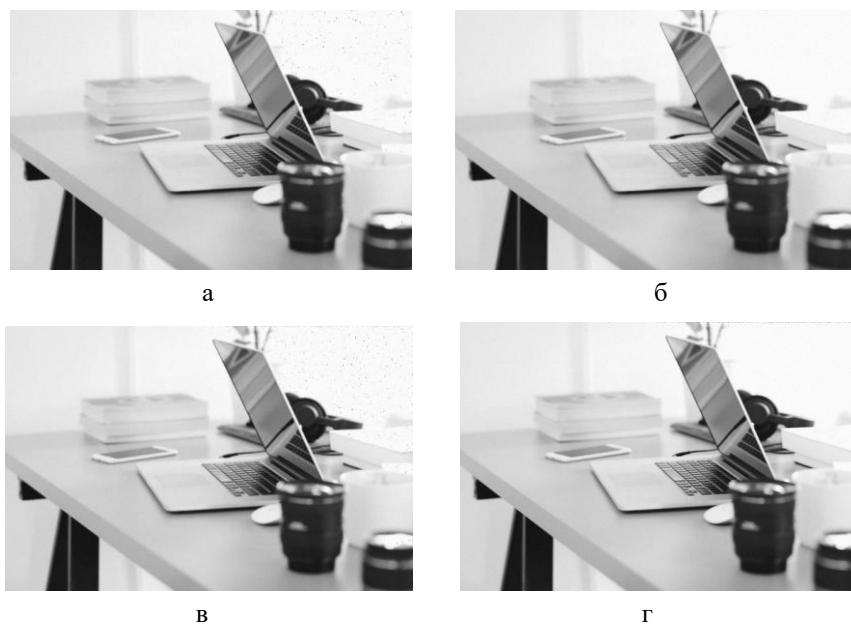


Рис. 4. Очищенное изображение от гауссовского шума с параметрами $Q_{avg} = 0$, $\sigma = 5$ после: а – медианной фильтрации с окном 3×3 ; б – медианной фильтрации с окном 5×5 ; в – фильтрации Винера с окном 3×3 ; г – фильтрации Винера с окном 5×5

Таблица 1

Значение PSNR для каждого метода фильтрации при различных степенях зашумления (p) импульсным шумом

| Используемые методы | p | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,05 | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 0,9 | 0,99 |
| Исходное зашумленное изображение | 20,15 | 17,16 | 13,19 | 10,17 | 8,41 | 7,62 | 7,2 |
| Медианная фильтрация с окном 3×3 | 43,02 | 40,61 | 29,5 | 17,25 | 10,86 | 8,46 | 7,33 |
| Медианная фильтрация с окном 5×5 | 37,84 | 37,44 | 35,66 | 27,4 | 14,24 | 9,45 | 7,45 |
| Фильтрация Винера с окном 3×3 | 21,92 | 19,7 | 16,59 | 13,66 | 11,64 | 10,65 | 10,09 |
| Фильтрация Винера с окном 5×5 | 23,69 | 21,3 | 17,63 | 14,30 | 12,1 | 11,05 | 10,45 |

Согласно результатам, которые представлены в табл. 1, медианная фильтрация с окном 3×3 лучше справляется со слабой степенью зашумления изображения ($p=0.05 \dots 0.1$), так как приводит к меньшему искажению (размытию) очертаний объектов на изображении. Для подавления шумов средней интенсивности ($p=0.25 \dots 0.75$) необходимо использовать медианный фильтр с большим размером окна фильтрации (5×5), так как при увеличении размера окна растёт способность

фильтра подавлять шумовую компоненту. Однако малые по размеру объекты на изображении могут быть целиком удалены при больших размерах окна фильтрации. При искажениях высокой интенсивности ($p=0.9...0.99$) линейный фильтр (фильтр Винера) лучше справляется с зашумленным сигналом, чем медианный, так как его алгоритм предназначен для минимизации квадратичной ошибки между исходным и восстановленным изображением.

Основным недостатком медианной фильтрации является размытие изображения, что становится особенно заметным при обработке изображений, искаженных импульсным шумом с высокой интенсивностью. Для уменьшения данного негативного эффекта были предложены следующие способы медианной фильтрации:

- ♦ использование крестообразной формы ядра фильтра. Данный способ прост в реализации, быстр и позволяет сохранить больше прямых кромок, линий и углов в изображении, но хуже осуществляет фильтрацию зашумленного сигнала, чем фильтр с однородным ядром [15];

- ♦ использование адаптивного медианного фильтра. Данный тип фильтрации предварительно определяет наличие импульсного искажения пикселя [16, 17], а затем осуществляет его фильтрацию. Также в основе данного типа фильтра лежит синтез различных методов фильтрации. Например, в работе [18] предложен метод совместного использования медианных и усредняющих фильтров, в основе которого лежит концепция увеличения размера маски фильтра до тех пор, пока не будет получено приемлемое значение. Также данный метод был использован в работе [19] для обработки цветных изображений. Другой метод [20] предлагает использовать окна различного размера, которые будут применяться на основе предварительно анализа обрабатываемого изображения. Все вышеперечисленные методы позволяют весьма эффективно справляться с импульсным шумом, не размывая и не смещая края крупных объектов на изображении, но сложны в реализации и требуют больших вычислительных затрат.

Интересным направлением дальнейших исследований является применение РКИХ-фильтров [9] в адаптивной медианной фильтрации для уменьшения вычислительных затрат при фильтрации изображения.

Таблица 2

Значение PSNR для каждого метода фильтрации при различных степенях зашумления (σ) гауссовским шумом

| Используемые методы | σ | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 5 | 25 | 50 | 75 | 90 | 99 |
| Исходное зашумленное изображение | 48,13 | 34,15 | 20,18 | 14,16 | 10,64 | 9,05 | 8,22 |
| Медианная фильтрация с окном 3x3 | 44,59 | 39,74 | 27,76 | 21,87 | 18,41 | 16,8 | 16 |
| Медианная фильтрация с окном 5x5 | 38,14 | 37,28 | 30,9 | 25,78 | 22,51 | 20,97 | 20,17 |
| Фильтрация Винера с окном 3x3 | 50,71 | 40,87 | 24,66 | 18,49 | 14,95 | 13,35 | 12,53 |
| Фильтрация Винера с окном 5x5 | 47,77 | 42,3 | 25,86 | 19,51 | 15,95 | 14,35 | 13,52 |

Согласно результатам, которые представлены в табл. 2, фильтр Винера лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при малых его значениях средне-квадратичного отклонения ($\sigma = 1...5$). Однако применение фильтра Винера приво-

дит к более сильному размытию участков изображения (к потере деталей и контуров изображения), чем медианного фильтра, так как его применение связано с предположением о стационарности изображения. А поскольку наличие краев изображения служит нарушением стационарности, винеровская фильтрация не является строго оптимальной [21].

Одной из особенностей фильтра Винера при реализации фильтрации изображений является возникновение неопределенной ситуации, когда центр окна близок к границе изображения, и несколько элементов маски находятся вне изображения. Данный эффект можно наблюдать у правого верхнего угла на рисунке 4,б, где полоса зашумленных пикселей остается не отфильтрованной. Существует три способа, позволяющих учитывать это обстоятельство:

- 1) ограничение перемещения центра окна по изображению (т. е. установления рамок, за которые запрещено выходить окну фильтра);
- 2) расширение изображения путем добавления строк и столбцов с нулевыми значениями;
- 3) расширение изображения, повторяя строки и столбцы изображения симметрично границе.

После фильтрации добавленные строки и столбцы удаляются, а обработанное изображение возвращается с исходным размером. Однако следует учитывать, что значения пикселей, использованных для расширения изображения, оказывают влияние на результат фильтрации пикселя внутри граничной полосы, ширина которой зависит от размеров окрестности, используемой при фильтрации. Например, если маска фильтра имеет размеры 5×5 пикселей, то с каждой стороны добавляются по две строки и столбца.

Заключение. В результате применения исследуемых видов фильтраций над зашумленными изображениями установлено, что медианный фильтр с окном 3×3 лучше справляется с очисткой изображения от импульсного шума малой интенсивности ($p=0.05 \dots 0.1$) и с окном 5×5 с очисткой изображения средней интенсивности зашумления ($p=0.25 \dots 0.75$). Также медианный фильтр лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при его средних ($\sigma = 25 \dots 75$) и высоких ($\sigma = 90 \dots 99$) значениях среднеквадратичного отклонения.

Фильтр Винера с окнами 3×3 и 5×5 лучше справляется с фильтрацией гауссовского шума при малых его значениях среднеквадратичного отклонения ($\sigma = 1 \dots 5$). Также фильтр Винера лучше справляется с импульсным шумом высокой интенсивности зашумления ($p=0.9 \dots 0.99$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital image processing // Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. – 2007. – 976 p. – ISBN: 978-0-13-168728-8.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. *Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. В.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
4. *Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L.* Digital image processing using MATLAB // Upper Saddle River, NJ: PrenticeHall, Inc. – 2010. – 344 p. – ISBN: 978-0-9820854-0-0.
5. Проблема подавления шума на изображениях и видео и различные подходы к ее решению. – <https://docplayer.ru/57372769-Problema-podavleniya-shuma-na-izobrazheniyah-i-video-i-razlichnye-podhody-k-ee-resheniyu.html> (дата обращения: 10.05.2021).
6. *Buades A., Coll B. and Morel J.M.* A review of image denoising algorithms, with a new one // SIAM Multiscale Modeling and Simulation. – 2005. – Vol. 4. – P. 490-530.
7. Сложение и измерение шума. – https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Faddition_and_noise_measurement.html%23 (дата обращения: 11.05.2021).

8. Турулин И.И. Управляемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 308 с.
9. Турулин И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
10. Турулин И.И., Ткаченко М.Г. Быстроперестраиваемые цифровые фильтры: монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 104 с.
11. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Цифровые изображения: от получения до обработки. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с. – ISBN 978-985-6744-80-1.
12. Родионов С.А., Вознесенский Н.Б., Щеколян Э.М. Обработка результатов измерения дисторсии проекционных объективов // Известия вузов. Приборостроение. – 1991. – Т. XXXIV, № 7. – С. 61-68.
13. Миленин Н.К. Шумы в формирователях сигнала на ПЗС // Техника кино и телевидения. – 1980. – № 6. – С. 51-57.
14. Селянкин В.В., Скорухин С.В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 82 с.
15. Пример: Медианное и квантильное фильтрование. – https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Fexample_median_and_quantile_filtering.html%23 (дата обращения: 12.05.2021).
16. Fabijańska A., Sankowski D. Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images // IET Image Processing. – 2011. – Vol. 5, Issue 5. – P. 472-480. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
17. Ng P.-E., Ma K.-K. A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images // IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1506-1516. – Doi: 10.1109/TIP.2005.871129.
18. Peixuan Z., Fang L. A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise // IEEE Signal Processing Letters. – 2014. – Vol. 21, Issue 10. – P. 1280-1283. – Doi: 10.1109/LSP.2014.2333012.
19. Roy A., Singha J., Manam L., Laskar R.H. Combination of adaptive vector median filter and weighted mean filter for removal of high-density impulse noise from colour images // IET Image Processing. – 2017. – Vol. 11, Issue 6. – P. 352-361. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2016.0320.
20. Hsieh M.H., Cheng F.H., Shie M.C., Ruan S.J. Fast and efficient median filter for removing 1–99% levels of salt-and-pepper noise in images // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2013. – Vol. 26 (4). – P. 1333-1338. – Doi: 10.1016/j.engappai.2012.10.012.
21. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

REFERENCES

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing, *Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall*, 2007, 976 p. ISBN: 978-0-13-168728-8.
2. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
3. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V.V. Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatie izobrazheniy i video [Data compression methods. The device of archivers, image and video compression]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003, 384 p.
4. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital image processing using MATLAB, *Upper Saddle River, NJ: PrenticeHall, Inc.*, 2010, 344 p. ISBN: 978-0-9820854-0-0.
5. Problema podavleniya shuma na izobrazheniyakh i video i razlichnye podkhody k ee resheniyu [The problem of noise suppression in images and videos and various approaches to its solution]. Available at: <https://docplayer.ru/57372769-Problema-podavleniya-shuma-na-izobrazheniyah-i-video-i-razlichnye-podhody-k-ee-resheniyu.html> (accessed 10 May 2021).
6. Buades A., Coll B. and Morel J.M. A review of image denoising algorithms, with a new one, *SIAM Multiscale Modeling and Simulation*, 2005, Vol. 4, pp. 490-530.
7. Slozhenie i izmerenie shuma [Adding and measuring noise]. Available at: https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Faddition_and_noise_measurement.html%23 (accessed 11 May 2021).

8. Turulin I.I. Upravlyaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Controlled digital filters: a monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 308 p.
9. Turulin I.I. Osnovy teorii rekursivnykh KIKH-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
10. Turulin I.I., Tkachenko M.G. Bystroperestraivaemye tsifrovye fil'try: monografiya [Fast-tunable digital filters: a monograph]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008, 104 p.
11. Starovoytov V.V., Golub Yu.I. Tsifrovye izobrazheniya: ot polucheniya do obrabotki [Digital images: from receiving to processing]. Minsk: OIPI NAN Belarusi, 2014, 202 p. ISBN 978-985-6744-80-1.
12. Rodionov S.A., Voznesenskiy N.B., Shchekol'yan E.M. Obrabotka rezul'tatov izmereniya distorsii proektsionnykh ob'ektiv [Processing of the results of measuring the distortion of projection lenses], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 1991, Vol. XXXIV, No. 7, pp. 61-68.
13. Milenin N.K. Shumy v formirovatel'nykh signalakh na PZS [Noise in signal formers on a CCD], *Tekhnika kino i televiziya* [Film and television technology], 1980, No. 6, pp. 51-57.
14. Selyankin V.V., Skorokhod S.V. Analiz i obrabotka izobrazheniy v zadachakh komp'yuternogo zreniya: ucheb. posobie [Image analysis and processing in computer vision problems: a textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, 82 p.
15. Primer: Mediannoe i kvantil'noe fil'trovanie [Example: Median and quantile filtering]. Available at: https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help%2Fexample_median_and_quantile_filtering.html%23 (accessed 12 May 2021).
16. Fabijańska A., Sankowski D. Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images, *IET Image Processing*, 2011, Vol. 5, Issue 5, pp. 472-480. – Doi: 10.1049/iet-ipr.2009.0178.
17. Ng P.-E., Ma K.-K. A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, Vol. 15, Issue 6, pp. 1506-1516. Doi: 10.1109/TIP.2005.871129.
18. Peixuan Z., Fang L. A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise, *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, Vol. 21, Issue 10, pp. 1280-1283. Doi: 10.1109/LSP.2014.2333012.
19. Roy A., Singha J., Manam L., Laskar R.H. Combination of adaptive vector median filter and weighted mean filter for removal of high-density impulse noise from colour images, *IET Image Processing*, 2017, Vol. 11, Issue 6, pp. 352-361. Doi: 10.1049/iet-ipr.2016.0320.
20. Hsieh M.H., Cheng F.H., Shie M.C., Ruan S.J. Fast and efficient median filter for removing 1–99% levels of salt-and-pepper noise in images, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, Vol. 26 (4), pp. 1333-1338. Doi: 10.1016/j.engappai.2012.10.012.
22. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spektor A.A. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Digital image processing in information systems: a textbook]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Север Константин Олегович – Южный федеральный университет; e-mail: sever@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; кафедра информационных измерительных технологий и систем; д.т.н.; профессор.

Гужва Дмитрий Александрович – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Sever Konstantin Olegovich – Southern Federal University; e-mail: sever@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.

Turulin Igor Iyich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; the department of information measurement technologies and systems; dr. of eng. sciences; professor.

Guzhva Dmitry Alexandrovich – e-mail: aleksandrovich777@inbox.com; the department of theoretical foundations of radio engineering; post-graduate student.